

内蒙古二连盆地阿南凹陷腾格尔组一段下部特殊岩性段储集性能

孙振孟¹, 钱 铮², 陆现彩¹, 郭 琴³, 徐金覃¹, 史原鹏², 胡文瑄¹
SUN Zhenmeng¹, QIAN Zheng², LU Xiancai¹, GUO Qin³, XU Jintan¹, SHI Yuanpeng²,
HU Wenxuan¹

1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023;
2. 中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司, 河北 任丘 062552;
3. 北京奥能恒业能源技术有限公司, 北京 100083
1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing 210023, Jiangsu China;
2. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, Hebei, China;
3. Beijing UltraDo Resources Technology Inc., Beijing 100083, China

摘要:二连盆地阿南凹陷油气资源的勘探开发程度较高,但岩性油藏的勘探尚未取得突破。下白垩统腾格尔组一段下部的特殊岩性段是潜在的油藏储集层。通过岩矿鉴定、电子探针、扫描电镜等研究了该层段的岩石学特征和储集性能。结果表明,该岩性段由深灰色云质泥岩、灰色泥质云岩、钙质沉凝灰岩、钙质细砂岩构成,夹有薄层灰绿色块状凝灰岩,钙质胶结和泥质胶结为主要胶结类型。对凝灰岩和沉凝灰岩的元素地球化学分析发现,受成岩流体的影响,钙质沉凝灰岩中硅酸盐矿物和火山碎屑的溶蚀现象较普遍,导致更显著的重稀土元素亏损和粒间孔、溶蚀孔发育,这些次生孔隙和微裂缝能提供油气储集空间和运移通道。

关键词:沉凝灰岩;成岩作用;储集性能;特殊岩性段;阿南凹陷;二连盆地

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)04-0644-10

Sun Z M, Qian Z, Lu X C, Guo Q, Xu J T, Shi Y P, Hu W X. Reservoir property of the special lithologic section in the lower Tengger Formation of A'nan depression, Er'lian basin. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(4):644-653

Abstract: Although A'nan depression has been well prospected in past years, no lithologic reservoir has been discovered. The special lithologic section of the Tengger Formation is the potential reservoir strata. Based on lithologic characterization, scanning electronic microscopy, and electron probe measurement, the authors investigated the reservoir properties of the special lithologic section. The lithologic section is mainly composed of gray dolomitic mudstone, argillaceous dolomite, calcareous sedimentary stuff and calcareous fine sandstone intercalated with gray green massive tuff. The calcareous cementation and clayey cementation are the main types of cementation. The tuff and sedimentary tuff elemental geochemical analysis shows that, with the alteration of diagenesis fluid, the silicate and sedimentary tuff dissolved significantly, which led to abundant secondary pores and strong depletion of heavy rare earth elements. These secondary pores and intergranular pores together with micro-fracture constitute the main potential reservoir space and the migration paths of the hydrocarbon.

Key words: sedimentary tuff; diagenesis; reservoir property; special lithologic section; A'nan depression; Er'lian basin

收稿日期:2016-10-18;修订日期:2017-02-14

资助项目:国家科技重大专项《大中型油气田分布规律与差异性研究》(编号:2016ZX05002-006-005)

作者简介:孙振孟(1993-),男,在读硕士生,从事石油地质学研究。E-mail: zhenmengsun@126.com

通讯作者:陆现彩(1972-),男,博士,教授,从事含油气系统的地球化学过程及表面矿物学研究。E-mail: xcljun@nju.edu.cn

二连盆地陆相油气储量丰富,阿南凹陷是二连盆地剩余资源量较大的凹陷之一^[1],已发现多个构造油气藏,但岩性油藏的勘探尚无突破。地质勘探发现,在二连盆地腾格尔组一段(腾一段)下部和阿尔善组之间存在一套由云岩类、泥岩类、砂岩类、沉凝灰岩类、凝灰岩类组成的特殊岩性段^[2-3],此岩性段累计厚度较大,分布广泛。前人研究发现,此岩性段孔隙度、渗透率变化范围较大^[4],油气显示活跃,并有工业性流油的产出^[5],含油非均质性强,受物性条件控制明显。但是,该层段的岩石学和物性特征还没有得到系统研究。本文利用多种分析手段,开展了岩石学、地球化学和岩石孔隙结构研究,为阿南凹陷岩性油藏的勘探提供必要的数据库。

1 地质背景

二连盆地是在海西期地槽褶皱基底上发育起来的断陷盆地,是由下白垩统巴彦花群为沉积主体的中小规模的断陷型湖盆组合而成的盆地群,分为“五坳一隆”6个构造单元,在晚中生代以来的沉积过程中火山碎屑物质参与频繁^[6-8]。阿南凹陷是二连盆地的一个次级凹陷,属于二连盆地马尼特坳陷,南东紧邻苏尼特隆起,北西以贡尼-京特乌拉低凸起与阿北凹陷相隔,整体呈北东-南西向展

布,东西长约70km,南北宽约40km,面积2800km²^[9](图1)。下白垩统巴彦花群是阿南凹陷的沉积主体,自下而上划分为阿尔善组、腾格尔组和赛汉塔拉组(表1)。阿尔善组和腾一下段是主力生油层系,有效生油厚度为200~1200m^[1],本次研究的特殊岩性段位于腾一段下部,与下伏阿四段呈平行整合接触。

2 特殊岩性段的岩石学和地球化学特征

2.1 岩石学特征

通过对腾一段下部钻孔岩心的手标本观察和岩性鉴定可知,特殊岩性段由云质泥岩、泥质云岩、沉凝灰岩和钙质细砂岩构成,含有火山碎屑的岩石有凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质粉砂岩等;白云质岩石较发育,主要为微晶云岩;泥质岩石种类较多。该岩性段底部为砂岩、粉砂岩。岩石学特征分述如下。

微晶云岩:深灰色,致密块状,不显层理,白云石含量高于85%,石英、长石等碎屑含量低于15%,局部可见草莓状黄铁矿。白云石晶体小于0.03mm,多为他形晶、半自形晶,具有雾心亮边结构(图版I-a,b),无溶蚀现象,颗粒间有粘土矿物充填,有机质含量低。白云石的形成可能与火山活动带来的岩浆作用和湖底深部热液作用有关^[11]。

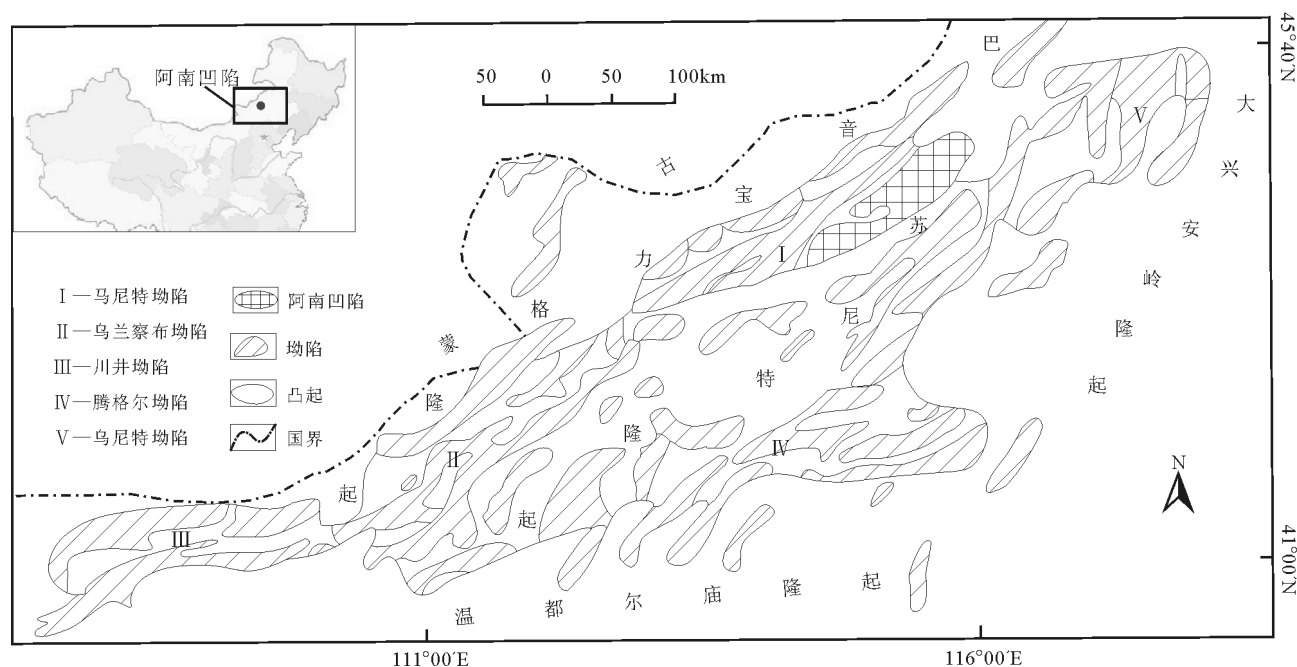


图1 二连盆地区域构造划分(据参考文献[10]修改)

Fig. 1 Regional tectonic divisions of the Er'lian basin

表 1 二连盆地阿南凹陷古生界地层简表
Table 1 Stratigraphic division of the A'nan depression in the Er'lian basin

界	统	群	组	段	岩性	厚度
中 生 界	下 白 垩 统	巴 彦 花 群	赛汉塔拉组		上部为灰绿色、灰色砂岩、粉砂岩与泥岩互层,上部泥岩含炭屑;中、下部为灰色砂砾岩,夹灰色泥岩	<400m
			腾格尔组	腾二段上	灰色-深灰色泥岩	<1040m
				腾二段下	灰色-浅灰色粉砂岩、细砂岩与泥岩互层	
				腾一段上	以灰色-深灰色泥岩为主,与泥质粉砂岩、粉砂岩和细砂岩互层	<718m
				腾一段下	上部以灰色-深灰色云质泥岩为主;下部以泥岩、粉砂岩为主,夹凝灰岩、沉凝灰岩,俗称“特殊岩性”段	
			阿尔善组	阿四段	底部为浅灰色砂砾岩;中部为灰色中-细砂岩;上部为灰、深灰色细砂岩	<186m
				阿三段	浅灰色-杂色角砾岩、砂砾岩、泥岩为主,夹安山岩层	<508m
				阿二段	以灰色泥岩为主,夹薄层浅灰色砂砾岩及泥质砂岩	<217m
				阿一段	上部为杂色砂砾岩与棕红及灰绿色泥岩呈不等厚互层;下部为大套杂色、紫红色、灰白色砾岩、砂岩,夹少量薄层棕红色及灰绿色泥岩	<443m

云质泥岩:深灰色-灰黑色,不显层理,泥质碎屑含量大于65%,白云石低于30%,为半自形-自形(图版 I -c、d)。含有少量他形铁白云石,根据颗粒间的接触关系判断,铁白云石形成晚于白云石。

云质泥岩:深灰色,纹层发育,纹层厚度不等,多小于0.1mm。纹层由泥晶白云石组成,其中散布有较大颗粒的洁净白云石(图版 I -e)。大颗粒白云石可能是微晶白云石重结晶的结果。有机碳含量大于3%,为优质的烃源岩。

钙质泥岩:灰色-深灰色,碳酸盐含量大于30%,方解石多以集合体形式存在,呈大于200 μm 的斑点状分布,白云石以泥晶和粉晶为主,表面干净,多为自形晶,零星散布(图版 I -f)。另外可见砂糖状白云石细晶集合体(图版 I -g),为晚期重结晶成因。

凝灰岩:灰绿色,块状(图版 I -n),粗安质火山灰含量大于90%,碳酸盐矿物含量低于10%。部分凝灰质经过脱玻化作用形成硅质微晶集合体,包括伊利石、绿泥石、混层矿物等。不同样品中的方解石颗粒大小、形态差异较大,既有数百微米大小、自形的方解石晶体(图版 I -h),又有几十微米大小、形态不规则散布于基质中的方解石晶体(图版 I -j)。部分方解石具有生长环带,边缘有硅化现象(图版 I -i)。少量样品发育具次生加大边的白云石。

沉凝灰岩:为该探区主要的致密油储层。浅灰色-浅灰绿色,层理发育,有包卷、泄水、滑塌等沉积

构造(图版 I -o)。次生长石发育,长石颗粒互相支撑形成粒间孔,被后期方解石充填(图版 I -k)。沉凝灰岩夹持于云质泥岩中,油浸。与凝灰岩不同的是,沉凝灰岩含有少量的陆源碎屑,且具有沉积岩的结构特征与沉积现象。沉凝灰岩具大量的原生粒间孔隙,具有孔隙度高、渗透性好的特点,是地层水或蚀变流体运移的重要通道。凝灰质的蚀变流体流通性较好,能将溶蚀物及时地运移出去,有利于次生孔隙的发育,为后期的油气充注提供必要的储集空间。

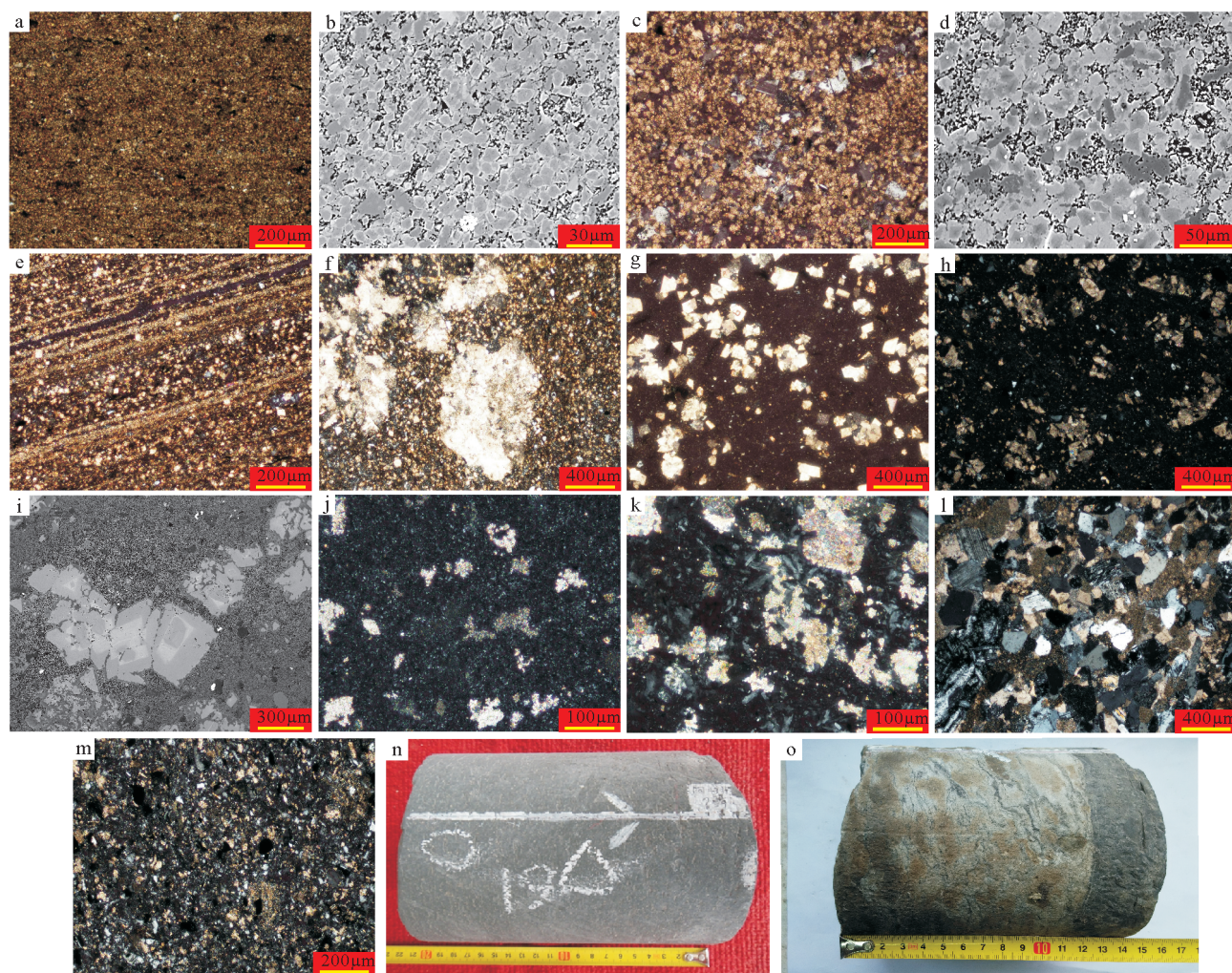
细砂岩:浅灰色-浅灰绿色,小型交错层理发育,钙质胶结为主。石英、长石含量大于60%,粘土矿物含量低于20%,方解石胶结物含量在10%左右(图版 I -l)。

粉砂岩:灰色-浅灰绿色,小型交错层理发育,火山碎屑和方解石含量低于20%,方解石以微晶为主,具有后期重结晶形成粉晶-粗晶的现象,充填于碎屑颗粒之间(图版 I -m)。

2.2 稀土元素地球化学特征

凝灰岩和沉凝灰岩的火山碎屑具有不同的蚀变特征,且在成岩作用上也有较大的差异。凝灰岩蚀变形成的粘土矿物(如伊利石、蒙脱石、绿泥石和混层矿物)能够很好地捕获稀土元素^[12],且在蚀变过程中发生显著的分馏作用^[13-15],本次选取46块样品进行全岩稀土元素测试(表2)。结果表明,凝灰岩稀土元素总量(ΣREE)的平均值为112.63×10⁻⁶,ΣLREE/ΣHREE平均值为7.69,经北美页岩标准

图版 I Plate I



a.微晶云岩,阿密2井,1-34/46,1545.9m,正交偏光;b.微晶云岩,阿密2井,1-34/46,1545.9m,电子探针;c.云质泥岩,阿密2井,1-8/46,1541.9m,正交偏光;d.云质泥岩,背散射图片中含铁白云石较白云石亮,阿密2井,1-8/46,1541.9m,电子探针;
e.纹层状云质泥岩,阿密2井,2-26/40,1553.9m,正交偏光;f.钙质泥岩,方解石集合体和白云石粉晶,阿密2井,3-27/43,1562.0m,正交偏光;g.钙质泥岩,砂糖状细晶白云石,阿密2井,3-19/43,1560.5m,正交偏光;h.凝灰岩,阿密2井,3-38/43,1564.4m,正交偏光;i.凝灰岩,阿密2井,3-42/43,1565.3m,电子探针;j.凝灰岩,阿密2井,4-2/42,1565.7m,正交偏光;k.沉凝灰岩,阿密2井,3-31/43,1562.9m,正交偏光;l.细砂岩,阿密2井,2-21/40,1552.9m,正交偏光;m.粉砂岩,阿密2井,6-6/40,1583.14m,正交偏光;n.凝灰岩,阿43井,2-27/39,2057.9m;o.沉凝灰岩,紧邻纹层状云质泥岩,滑塌构造,阿密2井,3-31/43,1562.9m

化后,稀土元素配分曲线较平缓(图2-a)。沉凝灰岩的配分模式图(图2-b)中,轻稀土元素曲线平直,重稀土元素曲线较陡,具有明显的右倾趋势,重稀土元素分馏程度高, $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$ 平均值为9.35,高于其他岩性的轻、重稀土元素比平均值,沉凝灰岩的 La_N/Yb_N 平均值是12.98, Ce_s/Yb_s 平均值为1.58。凝灰岩中4-2/42样品同样具有重稀土元素亏损的现象(图2-a)。在岩性上,该样品与沉凝灰

岩样品都含大量的次生长石。通过电子探针分析(图版I-j)可知,凝灰质脱玻化形成以钾长石和钠长石为主的次生长石。在脱玻化过程中,未能被次生长石捕获的稀土元素被活化释放出来。长石具有富轻稀土元素的特点,这与长石的稀土元素分配系数有关,毕献武等^[18]通过电子探针的微区分析,测得蚀变岩中原生条纹长石和次生钾长石的 La_N/Yb_N 值高于49.68。镧系元素的迁移能力从La到Lu和

表2 腾一段下部特殊岩性段的稀土元素地球化学分析结果
Table 2 REE geochemical analyses of special lithologic section of the lower K₁b₁

元素	泥岩	凝灰岩	沉凝灰岩	钙质砂岩	凝灰质泥岩-粉砂岩
$\Sigma \text{LREE}/10^{-6}$	120.97(15)	99.11(10)	107.03(5)	114.84(8)	120.00(8)
	52.64~174.38	55.11~127.51	69.41~101.90	84.38~139.26	106.72~150.07
$\Sigma \text{HREE}/10^{-6}$	15.57(15)	13.51(10)	11.36(5)	14.80(8)	15.27(8)
	9.64~22.25	5.30~17.37	9.68~14.37	12.44~18.64	13.60~17.67
$\Sigma \text{REE}/10^{-6}$	136.54(15)	112.63(10)	118.40(5)	129.64(8)	135.29(8)
	62.29~196.62	63.27~143.21	79.75~158.75	96.82~157.90	120.67~196.62
$\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$	7.74(15)	7.69(10)	9.39(5)	7.82(8)	7.86(8)
	5.46~8.72	6.11~12.73	6.71~12.96	6.78~8.86	7.43~8.50
La_N/Yb_N	7.77(15)	8.37(10)	12.98(5)	7.98(8)	9.10(8)
	5.17~9.55	5.92~20.45	9.27~14.77	6.74~9.57	7.16~14.77
Ce_N/Yb_N	5.59(15)	6.32(10)	9.59(5)	5.95(8)	6.76(8)
	3.44~7.08	4.00~14.17	7.09~11.38	5.01~7.26	5.07~11.38
$\text{Ce}_N/\text{Ce}_N^*$	0.92(15)	0.92(10)	0.91(5)	0.91(8)	0.90(8)
	0.88~0.97	0.67~1.16	0.87~0.93	0.85~0.94	0.82~0.95
$\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*$	0.58(15)	0.64(10)	0.67(5)	0.63(8)	0.61(8)
	0.52~0.65	1.56~0.72	0.55~0.78	0.59~0.68	0.57~0.67
La_S/Yb_S	1.09(15)	1.17(10)	1.82(5)	1.12(8)	1.27(8)
	0.72~1.33	0.83~2.86	1.30~2.07	0.94~1.34	1.00~2.07
Ce_S/Yb_S	0.98(15)	1.04(10)	1.58(5)	0.98(8)	1.11(8)
	0.56~1.16	0.66~2.33	1.16~1.87	0.82~1.20	0.83~1.87
$\text{Ce}_S/\text{Ce}_S^*$	0.90(15)	0.89(10)	0.88(5)	0.88(8)	0.87(8)
	0.79~0.94	0.65~1.11	0.85~0.91	0.83~0.91	0.80~0.92
$\text{Eu}_S/\text{Eu}_S^*$	0.86(15)	0.95(10)	0.99(5)	0.93(8)	0.91(8)
	0.77~0.96	0.83~1.08	0.82~1.16	0.87~1.00	0.85~1.00

注: La_N/Yb_N 、 Ce_N/Yb_N 、 $\text{Ce}_N/\text{Ce}_N^*$ 和 $\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*$ 值是由 CI 球粒陨石^[16]标准化后的数据计算所得; La_S/Yb_S 、 Ce_S/Yb_S 、 $\text{Ce}_S/\text{Ce}_S^*$ 和 $\text{Eu}_S/\text{Eu}_S^*$ 的值是由北美页岩^[17]标准化后的数据计算所得。

表中下划线为分割线,分割线上为平均值(样品个数),分割线下为数值范围

Yb 逐渐增强,重稀土元素更易形成稳定的络合物而被蚀变流体带走^[19],因此含有长石的蚀变岩重稀土元素显示亏损的特征。

3 成岩作用特征

前人研究表明,阿南凹陷主力洼槽区特殊岩性段目前成岩演化阶段为早成岩阶段 B 期和晚成岩阶段 A 期 2 个成岩阶段^[20]。其主要的成岩序列为:压实作用,早期石英次生加大,方解石、白云石充填孔隙和交代颗粒,长石、方解石等易溶组分溶解,自生粘土矿物析出,晚期石英次生加大,铁方解石、铁白云石充填次生孔隙、交代颗粒^[21]。该段岩层经历多种成岩作用,其中以压实作用、溶蚀作用、胶结作用、交代作用、重结晶作用最显著。

3.1 压实作用

压实作用贯穿整个埋藏成岩阶段,是该岩性段经历的最显著的成岩作用之一。随着埋深的增加,压实作用逐渐增强,岩石孔隙逐渐减少,渗透性变差,对储层有一定的破坏作用。阿南凹陷主力洼槽区腾一段下部埋深在 1500m 以下,目前处于快速压实阶段,蒙脱石已向伊利石、绿泥石转化,岩石大量脱水,体积大幅度收缩^[22]。压实作用是导致储层储集物性变差的重要因素之一。

3.2 溶蚀作用

该区岩石以碳酸盐矿物、长英质和凝灰质溶蚀为主。沉凝灰岩中火山玻屑具有明显的溶蚀现象,溶蚀孔隙有花状长石晶簇充填(图版 I-f)。在钙质砂岩中,长石和方解石溶蚀现象显著。在压实成岩

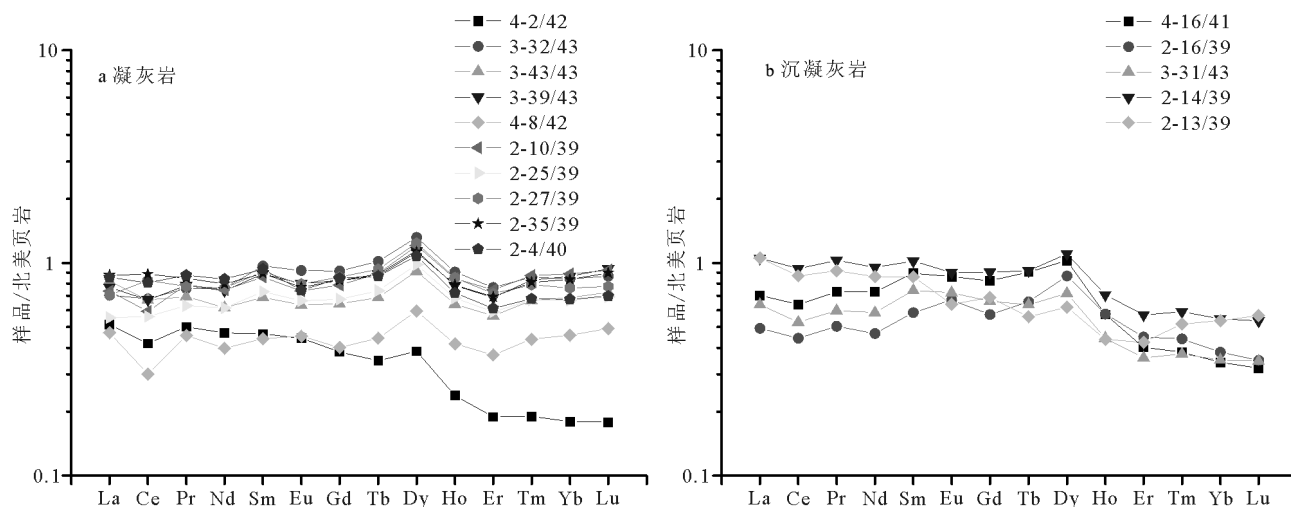


图2 稀土元素配分曲线

Fig. 2 REE distribution patterns

过程中,有机质成熟度逐渐提高,释放大量有机酸和酸性气体,地层流体的酸性逐渐增强,方解石胶结物被溶蚀形成港湾状溶蚀边^[23]。溶蚀作用是形成次生孔隙的主要因素,也是深部砂岩储层孔隙度和渗透率提高的主要原因,油气充注对储层有重要的影响^[24-26]。

3.3 胶结作用

该区砂岩以粘土胶结和钙质胶结为主。岩石中的粘土矿物包括蒙脱石、伊利石、绿泥石、混层粘土等。部分粘土胶结物(如蒙脱石)来自火山碎屑的蚀变,在成岩过程中,随着埋深和温度的增加及地层孔隙水成分的变化,蒙脱石逐渐消失,混层矿物和伊利石、绿泥石等的含量逐渐增加。

钙质胶结物以方解石为主,分别形成于成岩作用早期和晚期。第一期次方解石胶结物形成于成岩作用早期,方解石胶结物以微晶-粉晶为主,呈粒状、衬边状充填于孔隙内。第二期次方解石胶结物晚于次生长石的形成,方解石充填于长石颗粒孔隙和凝灰质脱玻化后产生的次生孔隙中。

3.4 交代作用

主要表现为碳酸盐矿物间的交代作用,方解石被交代形成白云石,含铁白云石交代白云石形成亮边状结构。钙质凝灰岩中的碳酸盐矿物边缘具有硅化现象,这是由 SiO_2 对碳酸盐矿物的交代作用导致的,其中 SiO_2 来源于凝灰质的溶蚀或粘土矿物的转化^[27-28]。

3.5 重结晶作用

特殊岩性段的重结晶作用发育,主要为微晶白

云石重结晶形成粉晶-细晶白云石,如砂糖状细晶白云石。部分方解石颗粒同样发生重结晶作用,如微晶方解石重结晶形成粉晶-粗晶,方解石胶结物重结晶形成连晶。

4 储层特征

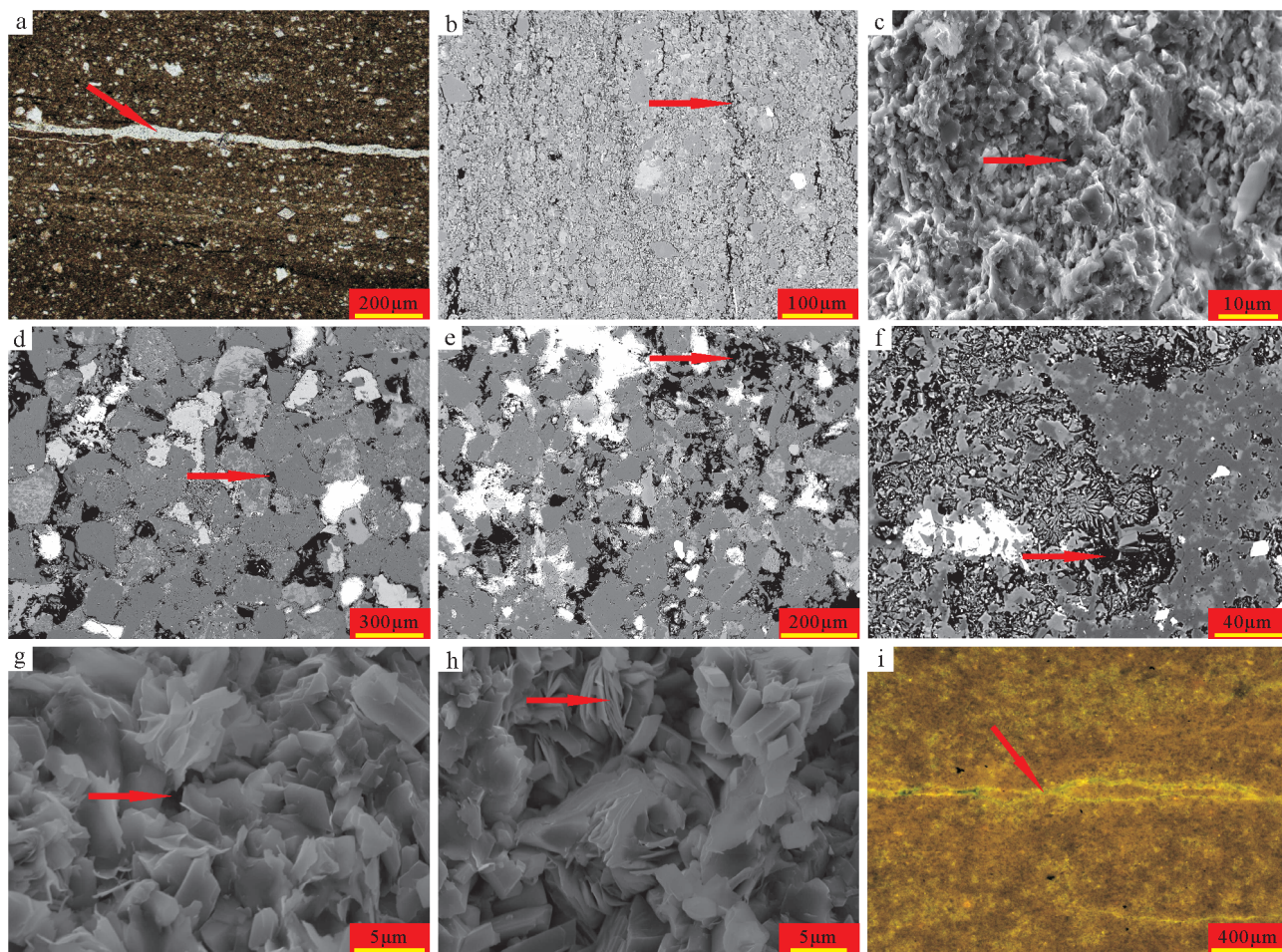
4.1 储集空间类型及组合

该区特殊岩性段油气的主要储集空间为岩石中的微孔隙。目前,国内外对微孔隙并没有统一的划分依据和类型,本文按照微孔隙的成因大类划分为原生沉积孔隙和成岩后生改造孔隙两大类。其中,原生沉积孔隙可进一步划分为粒间孔和粘土矿物间孔;成岩后生改造孔隙又进一步划分为有机孔、溶蚀孔和微裂隙3类。

泥质岩类为本区主力烃源岩。腾一下段云质泥岩的TOC平均值大于1%,其中纹层状云质泥岩有机碳含量平均值大于3%,氯仿沥青“A”的平均含量大于0.1%,属于优质的陆相湖盆烃源岩。该岩层孔隙发育、孔径细小^[10],以粒间孔(图版II-c)、粘土矿物间孔、有机孔和微裂缝为主。在成岩过程中地层流体对长石、石英产生一定的溶蚀作用,产生次生溶孔。样品中可见连通性很好的顺层微裂缝(图版II-a),粒间孔、微裂缝和层理面是泥质岩石与邻近岩层发生物质交换和油气运移的重要通道(图版II-b)^[29-30]。

该区特殊岩性段的主要储层为砂岩和沉凝灰岩,其油气储集空间包括粒间孔、粘土矿物间孔、溶

图版 II Plate II



a.微裂缝,纹层状云质泥岩,阿密2井,4-5/42,1566.4m,单偏光;b.层理面,纹层状云质泥岩,阿密2井,1-25/46,1544.3m,电子探针;c.粒间孔,云质泥岩,阿43井,2-5/39,2053.2m,扫描电镜;d.粒间孔,细砂岩,哈20井,15-23/34,2296.8m,电子探针;e.溶蚀孔,钙质细砂岩,阿密2井,6-38/40,1589.4m,电子探针;f.玻屑溶蚀孔,沉凝灰岩,阿密2井,2-26/40,1553.9m,电子探针;g.粒间孔,沉凝灰岩,阿43井,2-16/39,2055.4m,扫描电镜;h.粘土矿物晶间孔,沉凝灰岩,阿43井,2-16/39,2055.4m,扫描电镜;i.构造微裂缝,沉凝灰岩,阿密2井,4-6/42,1566.5m,荧光显微镜

蚀孔和微裂缝4种。

粒间孔为碎屑颗粒在沉积压实和胶结过程中残留的孔隙,孔隙原生特征明显,颗粒周边干净光滑,没有明显溶蚀现象(图版 II-d),受颗粒形态和接触关系的影响,孔隙形状多呈角形、条形,大小从数百纳米至数十微米不等(图版 II-g)。粘土矿物粒间孔形状多不规则,主要受粘土矿物排列方式的影响,粘土矿物晶体呈片状、板状,集合体以花状、鳞片状为主。粘土颗粒致密性较差,晶体间及集合体间富含大量数十纳米大小的晶间孔隙(图版 II-h)。溶蚀孔是储层的重要储集空间,在特殊岩性段内段普遍发育,溶蚀作用发生在沉积、成岩及成岩后的整个阶段。长英质

碎屑颗粒、玻屑和钙质胶结物的溶蚀作用尤其明显,孔隙大小在几十纳米到几十微米,多呈锯齿状、港湾状(图版 II-e、f)。沉凝灰岩中微裂缝发育,裂缝宽度约 $10\mu\text{m}$,可延伸数十厘米,是重要的油气运移通道和储集空间(图版 II-i),微裂缝的形成与地层压力、岩石脆性、构造活动等因素有关^[31]。该层段微裂缝的成因还有待进一步研究。

4.2 物性特征

目前,高压压汞法广泛使用在油气行业中,用来检测岩石样品的孔隙率、渗透率、表征岩石内部的气孔等。本次研究选取特殊岩性段部分样品进行压汞测试,分析岩石样品物性,以统计不同岩性

的储集性能。分析测试结果如表3所示。

测试样品中凝灰岩样品的孔隙度为 5.58%~6.03%,沉凝灰岩样品的孔隙度为 8.61%~10.59%,均低于细砂岩 14.41%的孔隙度。虽然凝灰岩的孔隙度在 3 种岩石中最低,但其渗透率($1.16\times 10^{-3}\sim 1.78\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)高,启动压力(0.04~0.08MPa)小,经过压力压裂后方便开采。沉凝灰岩虽然渗透率($0.03\times 10^{-3}\sim 1.15\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)较低,启动压力(0.05~2.03MPa)变化较高,但总体物性较好。细砂岩虽然渗透率($0.47\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)较低,启动压力(0.33MPa)较高,但其具有 3 种岩石中最高的孔隙度 14.41%,油气开采方便。3 种岩石总体为低孔低渗的致密储层,储集性能较好。

4.3 孔隙结构

气体等温吸附法和压汞法是泥页岩孔隙研究的常用方法^[32-38]。气体等温吸附曲线法是基于等温条件下样品的气体吸附量与相对压力的曲线,通过理论模型来计算样品的孔径分布情况。与适合表征微孔的 H-K 法^[39-44]和适合表征介孔的 BJH 法^[45-48]相比,通过求解 Tarazona 状态方程得到吸附等温线,反映孔隙组成的 DFT 法^[49-51],具有适用范围广和无需校正的优点^[52]。该方法适用于微孔和介孔介质的表征,难以揭示 200nm 以上的大孔和微缝隙,但是高压压汞法能够测试样品中 3nm~1000 μm 的孔径分布情况,同时利用 2 种分析手段可获得岩石完整的孔径分布曲线。

分析结果表明,特殊岩性段中沉凝灰岩的孔主要分布在 20~800nm 范围内,10nm 以下孔较少。砂

表 3 部分样品压汞测试结果

Table 3 MIP test results of the samples from the special lithologic section

岩性	样品编号	孔隙度/%	渗透率/ μm^2	启动压力/MPa
细砂岩	6-38/40	14.41	0.47×10^{-3}	0.33
	2-14/39	10.02	0.03×10^{-3}	2.03
	2-16/39	10.59	1.15×10^{-3}	0.05
	3-31/43	8.61	0.28×10^{-3}	0.49
沉凝灰岩	4-3/42	9.46	0.51×10^{-3}	0.16
	2-10/39	5.58	1.78×10^{-3}	0.04
	4-16/42	6.03	1.16×10^{-3}	0.08

岩孔主要分布在 10~200nm 范围内,分布区间范围小于沉凝灰岩(图3)。

5 结 论

(1)二连盆地阿南凹陷腾一段下部特殊岩性段岩性主要为深灰色微晶云岩、云质泥岩、深灰色纹层状云质泥岩、灰色钙质泥岩、钙质细砂岩、钙质凝灰质粉砂岩、灰绿色块状凝灰岩、钙质沉凝灰岩等。其中砂岩为该区常规储层,钙质沉凝灰岩具有较好的油气显示,为潜在的致密储层,纹层状云质泥岩为优质烃源岩。

(2)特殊岩性段内主要发育的成岩作用类型有溶蚀作用、压实作用、胶结作用、交代作用和重结晶作用。钙质胶结和粘土胶结是该区碎屑岩的主要胶结类型,溶蚀作用主要发生在沉凝灰岩和砂岩

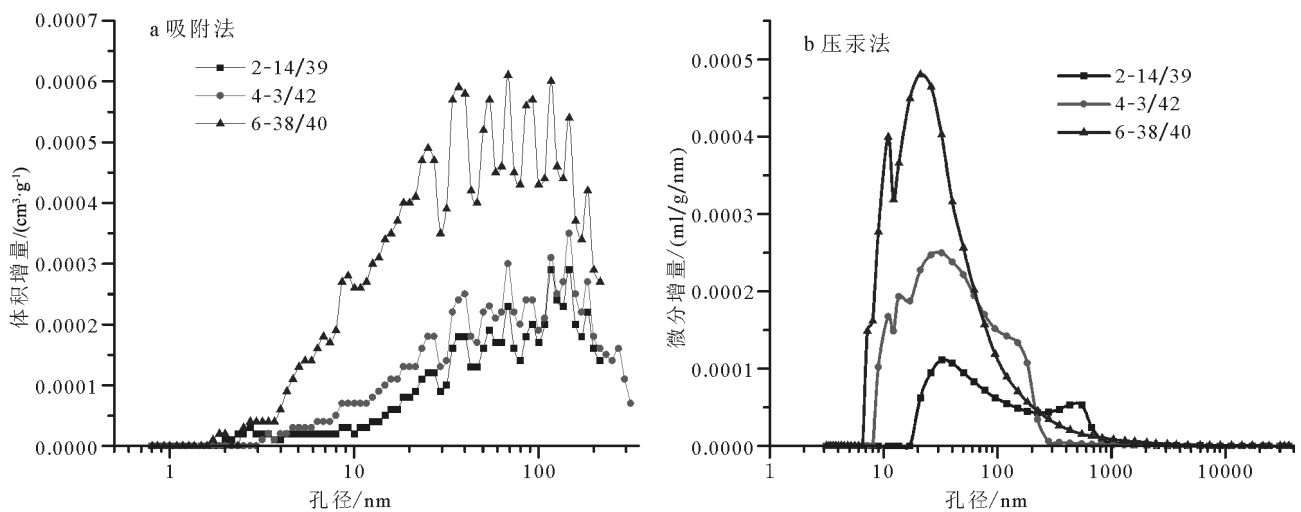


图 3 部分样品孔径分布曲线

Fig. 3 Pore size distribution of the samples from the special lithologic section

中。碳酸盐矿物具有明显的交代和重结晶现象。

(3)云质泥岩中粒间孔、微裂缝和层理面发育,是烃源岩排烃的主要通道。粒间孔、溶蚀孔和微裂缝是储层的主要储集空间和油气运移通道。

(4)凝灰岩中火山碎屑主要蚀变为粘土矿物,而沉凝灰岩中凝灰质蚀变为次生长石。受蚀变流体的影响,沉凝灰岩比凝灰岩的重稀土元素亏损程度更高。此外,蚀变流体有利于沉凝灰岩次生孔隙的形成,应为该区岩性油气藏勘探的目标。

致谢:本文得到项目组成员的大量帮助,审稿专家提出了宝贵的修改意见和建议,样品分析测试过程中南京大学地球科学与工程学院内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室老师进行了指导和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]李秀英,肖阳,杨全凤,等.二连盆地阿南洼槽岩性油藏与致密油勘探潜力[J].中国石油勘探,2013,18(6):56-61.
- [2]蓝宝锋,杨克兵,彭传利,等.二连盆地阿南凹陷致密油勘探潜力分析[J].复杂油气藏,2014,7(2):9-12.
- [3]杜金虎,易士威,雷怀玉,等.二连盆地岩性地层油藏形成条件与油气分布规律[J].中国石油勘探,2004,9(3):1-5.
- [4]赵贤正,降栓奇,淡伟宁,等.二连盆地阿尔凹陷石油地质特征研究[J].岩性油气藏,2010,22(1):12-17.
- [5]朱敏,郭睿博,崔永谦,等.二连盆地“特殊岩性段”沉积储层特征与成藏[J].内蒙古石油化工,2014,21:132-135.
- [6]费宝生,祝玉衡,邹伟宏,等.二连裂谷盆地群油气地质[M].北京:石油工业出版社,2001:14-15,114-121.
- [7]张文朝,雷怀玉,姜冬华,等.二连盆地阿南凹陷的油气演化与油气聚集规律[J].河南石油,1998,12(2):1-5.
- [8]易士威,李正文,焦贵浩.二连盆地凹陷结构与成藏模式[J].石油勘探与开发,1998,2:8-12.
- [9]孙志华,洪月英,吴奇之,等.二连盆地阿南凹陷气藏地震特征[J].天然气工业,2001,21(3):26-29.
- [10]杜金虎.二连盆地隐蔽油藏勘探[M].北京:石油工业出版社,2003:140-148.
- [11]郭强,钟大康,张放东,等.内蒙古二连盆地白音查干凹陷下白垩统湖相白云岩成因[J].古地质量,2012,14(1):59-68.
- [12]Hopf S,庞奖励.新西兰地热系统中稀土元素的行为[J].地质科学译丛,1995,12(2):45-51.
- [13]丁振举,刘丛强,姚书振,等.海底热液系统高温流体的稀土元素组成及其控制因素[J].地球科学进展,2000,15(3):307-312.
- [14]王希斌,鲍佩声,戎合.中国蛇绿岩中变质橄榄岩的稀土元素地球化学[J].岩石学报,1995,11:24-41.
- [15]赵志根,唐修义,杨起,等.哈密.淮北煤变质程度与稀土元素的关系研究[J].中国矿业大学学报,2001,30:165-169.
- [16]Anders E, Grevesse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1989, 53(1): 197-214.
- [17]Haskin M A, Haskin L A. Rare earths in European shales: a redetermination[J]. Science, 1966, 154(3748): 507-509.
- [18]毕献武,胡献忠, Cornell D H. 蚀变流体的来源: 矿化事变带中原生与次生长石的稀土元素证据[J]. 科学通报, 2000, 45(13): 1429-1432.
- [19]汪建明,陈可奎,宁仁祖.宁芜北段某些次火山岩和蚀变岩中的稀土元素[J].岩石矿物及测试,1985,4(2):97-102.
- [20]高海仁,李云.二连盆地宝勒根陶海凹陷下白垩统成岩作用研究[J].内蒙古石油化工,2012,17:132-134.
- [21]孙相灿,杨传胜,于兴河,等.冀中坳陷深县凹陷古近系碎屑岩储层成岩作用及成岩演化序列分析[J].海洋地质与第四纪地质,2014,2:135-142.
- [22]方杰.二连盆地下白垩统油气运移特征[J].石油实验地质,2005,27(2):181-186.
- [23]刘俊海,胡芬,宋文君,等.东营凹陷南斜坡储集岩成岩作用及对储层性能的影响[J].新疆石油学院学报,2003,15(3):21-26.
- [24]Bloch S, Lander R H, Bonnell L. Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(2): 301-328.
- [25]Haszeldine R S, Cavanagh A J, England G L. Effects of oil charge on illite dates and stopping quartz cement, calibration of basin models[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78/79: 373-376.
- [26]Jonk R, Hurst A, Duranti D, et al. Origin and timing of sand injection, petroleum migration, and diagenesis in Tertiary reservoirs, South Viking Graben, North Sea[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(3): 329-357.
- [27]Wolde G G, Broxton D E, Jr F M B. Mineralogy and temporal relations of coexisting authigenic minerals in altered silicic tuffs and their utility as potential low-temperature dateable minerals[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1996, 71(71): 155-165.
- [28]王行信.松辽盆地白垩系泥岩粘土矿物成岩演变特征及地质意义[J].石油天然气地质,1988,9(1):93-98.
- [29]Magara K. Comparison of porosity depth relationships of shale and sandstone[J]. Journal of Petroleum Geology, 1980, 3(2): 175-185.
- [30]刘庆,张林晔,沈忠民,等.东营凹陷湖相盆地类型演化与烃源岩发育[J].石油学报,2004,25(4):42-45.
- [31]杨超,张金川,李婉君,等.辽河坳陷沙三、沙四段泥页岩微观孔隙特征及其成藏意义[J].石油天然气地质,2014,35(2):286-294.
- [32]田华,张水昌,柳少波,等.压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J].石油学报,2012,33(3):419-427.
- [33]谢晓永,唐洪明,王春华,等.氮气吸附法和压汞法在测试泥页岩孔径分布中的对比[J].天然气工业,2006,26(12):100-102.
- [34]崔景伟,邹才能,朱如凯,等.页岩孔隙研究新进展[J].地球科学进展,2012,27(12):1319-1325.
- [35]Giesche H. Mercury porosimetry: a general (practical) overview[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2006, 23(1): 9-19.
- [36]焦堃,姚素平,吴浩,等.页岩气储层孔隙系统表征方法研究进展[J].高校地质学报,2014,20(1):151-161.
- [37]于洪观,范维唐,孙茂远,等.高压下煤对CH₄/CO₂二元气体吸附等温线的研究[J].煤炭转化,2005,28(1):43-47.
- [38]Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. Characterization of gas

- shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1099–1119.
- [39]欧成华, 易敏, 李士伦, 等. 高温高压下储层孔隙介质气体吸附等温线测试研究[J]. 石油地质与工程, 2002, 16(6): 26–28.
- [40]杨侃, 陆现彩, 徐金罩, 等. 气体吸附等温线法表征页岩孔隙结构的模型适用性初探[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 818–821.
- [41]杨正红, Thommes M. 气体吸附法进行孔径分析进展——密度函数理论(DFT)及蒙特卡洛法(MC)的应用[J]. 中国粉体技术, 2005, 11(s1): 36–42.
- [42]苏艳敏, 徐绍平, 王吉峰, 等. 活性炭的微孔结构对其选择性吸附 CH_4/N_2 混合气中 CH_4 的影响[J]. 天然气工业, 2013, 33(3): 89–94.
- [43]张和平, 黄南贵. 微孔材料的吸附分析方法研究[J]. 中国粉体技术, 2005, 11(s1): 89–95.
- [44]Horvath G, Kawazoe K. Method for the calculation of effective pore size distribution in molecular sieve carbon[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1983, 16(6): 470–475.
- [45]浦群, 杨杰, 吴启强, 等. 含中孔和微孔的多孔炭的孔结构表征[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(4): 52–55.
- [46]钟太贤. 中国南方海相页岩孔隙结构特征[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 1–4.
- [47]Curtis J B. Fractured shale–gas system[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921–1938.
- [48]Kruk M, Jaroniec M, Sayari A. Application of large pore MCM–41 molecular sieves to improve pore size analysis using nitrogen adsorption measurements[J]. Langmuir, 1997, 13(23): 6267–6273.
- [49]Ashvar C S, Devlin F J, Bak K L, et al. Ab initio calculation of vibrational absorption and circular dichroism spectra: 6, 8–dioxabicyclo[3.2.1]octane[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1996, 100(22): 9262–9270.
- [50]Dewar M J S, Zuebisch E G, Healy E F, et al. Am1 a new general purpose quantum mechanical molecular model[J]. Journal of the American Chemical Society, 2002, 115(12): 3903–3909.
- [51]Tomasi J, Persico M. Molecular interactions in solution: An overview of methods based on continuous distributions of the solvent[J]. Chemical Reviews, 1994, 94(7): 2027–2094.
- [52]杨侃, 陆现彩, 刘显东, 等. 基于探针气体吸附等温线的矿物材料表征技术: ii 多孔材料的孔隙结构[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 4: 362–368.

《地质通报》第 36 卷第 5 期要目预告

攀西层状基性–超基性岩体锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其地质意义	李华芹等
攀西红格矿区辉长岩和正长岩的 SHRIMP U–Pb 和 Sm–Nd 定年及其地质意义	李华芹等
扬子陆核古元古代变质事件: 来自孔兹岩系变质锆石 U–Pb 同位素年代学的证据	邱啸飞等
湖北大洪山打鼓石群沉积时限–来自碎屑锆石 U–Pb 年龄的证据	刘 浩等
云开地区早古生代竹雅–石板辉长岩锆石 U–Pb 定年与 Lu–Hf 同位素研究	周 岱等
桂北新寨强过铝质花岗岩的岩石成因及其构造意义	
——来自年代学、地球化学及 Sr–Nd–Hf 同位素制约	贾小辉等
湖南桃江地区印支期辉绿岩成因: 地球化学、年代学和 Sr–Nd–Pb 同位素约束	金鑫鏢等
桂东南马其岗石英二长斑岩年代学、地球化学特征及成因研究	王晓地等
西藏冈底斯中西段主碰撞期成矿事件——德新矿区花岗斑岩锆石 U–Pb 年龄证据	柯贤忠等
宜昌樟村坪埃迪卡拉陡山沱组碳同位素变化及成因分析	周 鹏等
峡东地区早奥陶世碳同位素异常及其成因分析	张保民等
鄂西长阳 ZK04 钻孔埃迪卡拉陡山沱组碳同位素组成特征及其地层对比意义	危 凯等
湖南花垣铅锌矿床成矿物质来源与成矿机制: 来自 S、Pb、Sr 同位素证据	李 堃等
湘西花垣地区铅锌矿床碳氢氧同位素特征及其对成矿流体来源的指示	周 云等
湘西地区铅锌矿成矿物质来源讨论: 来自 S、Pb 同位素的证据	曹 亮等
湖南省留书塘铅锌矿床 S、Pb 同位素特征及意义	程顺波等
湘东北七宝山铜多金属矿床成矿时代及成矿物质来源: 石英脉 Rb–Sr 定年和 S–Pb 同位素组成	胡俊良等
湖北随州黑龙潭金矿石英 Rb–Sr 同位素年龄及其地质意义	彭三国等
湘东南铜山岭铅锌多金属矿床成矿时代与成矿物质来源: Sm–Nd 等时线年龄和 Pb 同位素证据	王云峰等
贵州铜仁塘边铅锌矿床成矿时代和成矿物质来源: 来自 Rb–Sr 同位素测年和 S–Pb 同位素证据	于玉帅等
大兴安岭中段索伦地区白音高老组火山岩锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及构造意义	谭皓元等